ابزار ارتعاشی التراسونیک یک‌بعدی و دوبعدی*

سعید امینی(۱)   محمدرضا خسروجردی(۲)   مهدی محمدی‌مهر(۳)

چکیده *این تحقیق به طراحی و ساخت ابزار ارتعاشی تراش‌کاری و انجام آزمایش‌های مربوط می پردازد. ابتدا ابزار ارتعاشی یک‌بعدی با مود ارتعاشی خمشی طراحی و ساخته شد. ابزار ارتعاشی یک بعدی همراه با پیزوالکتریک‌های نیم‌رینگ به‌منظور تحریک مود خمشی ابزار طراحی گردید. این ابزار توسط نرم‌افزار آباکوس در فرکانس حدود ۲۰ کیلوهرتز طراحی و سپس با توجه به هندسهٔ به‌دست آمده توسط اجزای محدود ساخته شد. در بخش بعدی ابزار ارتعاشی دوبعدی با مود بیضوی در نرم‌افزار آباکوس طراحی و سپس ساخته شد. آزمایش‌هایی در عملیات تراش‌کاری به‌کمک ابزار ارتعاشی یک‌بعدی با مود خمشی و دوبعدی با مود بیضوی بر روی مس انجام شد و صحت عملکرد ابزارهای ساخته شده، بررسی گردید. نتیجه آن‌که با استفاده از ابزار ارتعاشی در فرایند تراش‌کاری کاهش چشم‌گیری در نیروی اصلی ماشین‌کاری به‌دست آمد.*

واژه‌های کلیدی ابزار ارتعاشی یک‌جهته، ابزار ارتعاشی دوجهته، التراسونیک، ماشینکاری ارتعاشی، تراش‌کاری.

One and Two- Dimensional Ultrasonic Vibration Tool

S. Amini   M. R. Khosrojerdi   M. Mohammadimehr

Abstract *This research is carried out to design and manufacturing of lathe vibration tool and their tests. Firstly, one-dimensional vibration tool is designed and made of the bending vibration mode. One-dimensional vibration tool with half piezoelectric rings is considered to excite the bending mode of tool. Structure of vibration tool is designed in Abaqus software about 20 KHz and then is made with respect to the best obtained geometry of tool for bending vibration mode. Finally, two- dimensional vibration tool is designed and made in Abaqus software for elliptical vibration mode. Also, experiment tests are done in turning operations using one- and two-dimensional vibrating tools with bending and elliptical modes on the copper, respectively and the accuracy of the made instruments is investigated. Results show that vibration tool in turning process reduces the main cutting force.*

Key Words One dimensional vibration tool, Two dimensional vibration tool, Ultrasonic, Vibration tool, Turning.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۲/٤/٤ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۱۱/۲۷ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول: دانشیار گروه ساخت و تولید، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان. Amini.s@kashanu.ac.ir

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد گروه ساخت و تولید، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان.

(۳) استادیار گروه مکانیک جامدات، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان.

مقدمه

با پیدایش مواد جدید مانند کامپوزیت‌ها، سوپر آلیاژها، آلیاژهای پایه تیتانیومی و پایه نیکلی و نیاز به ماشینکاری این‌گونه مواد، روش‌های ماشین‌کاری نیز توسعه یافت. یکی از این روش‌ها استفاده از ارتعاش التراسونیک در فرآیند تراش‌کاری است که به ماشین‌کاری ارتعاشی (Vibration Cutting-VC) یا تراش‌کاری به‌کمک ارتعاش التراسونیک (Ultrasonic Assister Turning UAT) معروف است [1-3]. در تراش‌کاری به‌کمک التراسونیک معمولاً ابزار برشی با یک فرکانس التراسونیک در جهت برش، تغذیه و یا شعاعی ارتعاش می‌کند که معمول‌ترین نوع آن، ارتعاش در جهت برش (VC) یا در جهات برش و شعاعی به‌صورت دوبعدی (Elliptical Vibration Cutting (EVC) می‌باشد. تحقیقات متعددی در این زمینه انجام شده است. رحمان و همکاران جداشدن ابزار از براده و از قطعه‌کار را در فرآیند ماشین‌کاری ارتعاشی بیضوی بیان کرده‌اند [4, 5]. از آن‌جایی که هندسهٔ ابزار، مخصوصاً شعاع نوک ابزار تأثیر زیادی بر روی راندمان ماشین‌کاری ارتعاشی یک‌بعدی دارد، چندین آزمایش تحقیقاتی در زمینهٔ تأثیر شعاع نوک ابزار بر روی راندمان فرآیند EVC با بررسی نیروی برشی، سایش ابزار و پرداخت سطح نهایی، انجام دادند. در این آزمایش‌ها تنگستن کارباید زینتر شده (WC) با استفاده از ابزارهای PCD ماشین‌کاری شد. نتیجه این تحقیق، بهتر بودن شعاع 0.6 mm در مقایسه با سایر شعاع‌های نوک ابزار بود [6]. سونگ [7] در تحقیق دیگری کنترل سایش ابزار در ماشین‌کاری با ابزار الماس تک کریستال را بر روی استیل انجام داد. و نتایج این تحقیق نشان داد که سایش ابزار الماس بیشتر به زمان تماس ابزار با قطعه‌کار در مقایسه با سرعت برشی بستگی دارد و به‌وسیله کاهش زمان تماس به کمتر از 0.3 ms سایش ابزار کاهش بسیاری می‌یابد. در تحقیق دیگری از سیال اتمیزه شده به‌وسیله گاز به‌همراه ابزار ارتعاشی التراسونیک برای برش آلیاژ تیتانیوم استفاده شد که کیفیت سطح نهایی قطعه‌کار بهبود پیدا کرد و سایش ابزار الماس کمتر شد [8]. در تحقیق دیگری که توسط استاس ویکیوس انجام شد، این نتیجه به‌دست آمد که کیفیت سطح نهایی قطعه‌کار به‌طور زیادی به ارتعاش نوک ابزار بستگی دارد و این ارتعاش به‌وسیلهٔ تحریک یک مود ارتعاشی خاص ابزار تراش‌کاری ایجاد می‌شود. در این ابزار مود خمشی دوم،که در راستای نیروی برشی است، به‌وسیلهٔ مرتعش کردن پیزوالکتریک در راستای محور ابزار با فرکانسی مطابق فرکانس طبیعی به حالت تشدید می‌رسد و بدین وسیله زبری سطح و سایش ابزار کاهش می‌یابد [9]. ماشین‌کاری به‌کمک ارتعاش بیضوی برای اولین بار توسط شاموتو و موریواکی [10] ابداع شد. سپس این ابزار برای ماشین‌کاری مواد سخت برش استفاده شد که راندمان بالاتری در مقایسه با ماشین‌کاری سنتی داشت [11-13].

برینک سمیر و همکارانش با استفاده از یک عملگر پیزوالکتریک که ابزار برشی آن خارج از محور بسته شده است، یک حرکت بیضی شکل را در حالت تشدید ایجاد نمودند [14]. این کار سبب ایجاد یک ارتعاش دوبعدی در جهت پیشروی و عمق تراش می‌شود. این تحقیق صافی سطح و تأثیر مدت زمان درگیری ابزار با قطعه‌کار را در حین عملیات UAT (Ultrasonic Assisted Turning) بررسی نموده است که نمونه‌های استفاده شده از جنس فولاد کربنی CK 45 و آلومینیوم می‌باشند. هم‌چنین عمر ابزار نیز در این تحقیق اندازه‌گیری شده است و موجب شده که عمر ابزار بهبود یابد. در پژوهش ما و همکاران [15]، سه حالت ماشین‌کاری به‌کمک ارتعاش بیضوی، ماشین‌کاری به‌کمک ارتعاش یک درجه آزادی و ماشین‌کاری سنتی (بدون ارتعاش) آزمایش شده و از نظر نیروی محوری و دقت فرم قطعات تولیدی مقایسه‌ای بین این سه روش صورت پذیرفت. سرنیوای [16] علاوه بر انجام آزمایش تجربی از ابزاری استفاده کرد که در آن از حالت تشدید ابزار استفاده نشده است. طراحی ابزار در این تحقیق به‌صورتی است که تقویت دامنهٔ ارتعاش ابزار با کمک به تشدید رساندن ابزار (وارد کردن ارتعاش در فرکانس طبیعی ابزار) نبوده است، بلکه این تقویت با استفاده از اهرم‌های مکانیکی

صورت گرفته است. شاموتو و هینو [17] ماشین‌کاری با ارتعاش التراسونیک بیضوی را بر روی تنگستن کارباید مورد بررسی قرار داد. در تحقیقات انجام‌شده بیشتر بر روی فرآیند ماشین‌کاری ارتعاشی کار شده است. امینی و همکاران در تحقیقات خود با استفاده از ابزار ارتعاشی، فرآیند تراش‌کاری به‌کمک ارتعاش التراسونیک را مورد بررسی قرار داده اند [18,19].

از تحقیقات انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که ماشین‌کاری به‌کمک ارتعاش التراسونیک باعث بهبود توانایی ماشین‌کاری می‌گردد. بدین ترتیب باعث کاهش نیروی ماشین‌کاری، افزایش عمر ابزار، صافی سطح بهتر و دقت بالاتر قطعه‌کار می‌شود و توانایی ماشین‌کاری مواد با استحکام برشی بالا را بهبود می بخشد. ولی از آن‌جا که تحقیق‌های انجام‌شده بیشتر بر روی اثر فرآیند بوده است، بر روی طراحی ابزار ارتعاشی و بهبود شرایط طراحی و عملکرد آن به‌طوری که قابلیت نصب و استفاده از آن افزایش یابد کمتر کار شده است. طراحی و ساخت ابزار ارتعاشی که بتواند به‌آسانی بر روی دستگاه تراش نصب گردد و در کاربردهای صنعتی از آن استفاده کرد کار جدیدی است که در این تحقیق به آن پرداخته شده است.

در این مقاله ابزار ارتعاشی یک‌بعدی با مود خمشی و دوبعدی با مود خمشی و طولی که توسط پیزوالکتریک نیم‌رینگ و تمام‌رینگ تحریک می‌شود در نرم‌افزار اباکوس طراحی و تحلیل مودال شدند و سپس با توجه به نتایج تحلیل این ابزارها ساخته شدند. ویژگی جدید این نوع ابزارها قابلیت نصب بر روی دستگاه تراش به‌صورت افقی و به شیوهٔ ابزارهای سنتی را دارند. با اندازه‌گیری دامنهٔ ارتعاش آن‌ها، ماشین‌کاری بر روی مس انجام شد. در نتیجه نیروی ماشین‌کاری توسط ابزارهای ارتعاشی یک‌بعدی با مود خمشی و دوبعدی با مود بیضوی در مقایسه با ماشین‌کاری معمولی کاهش یافت.

طراحی ابزار ارتعاشی یک‌جهته با مود خمشی و ساخت آن

به‌طور کلی سه نوع مود ارتعاشی برای ابزارهای ارتعاشی وجود دارد که عبارتند از طولی، خمشی و پیچشی که در این ابزارها از مود ارتعاشی خمشی و طولی استفاده شده است. در فرآیند تراش‌کاری نیز سه نوع ارتعاش می‌توان به ابزار داد که عبارتند از ارتعاش در جهت برش، تغذیه و شعاعی. به‌علت بهبود توانایی ماشین‌کاری در ابزارهای ارتعاشی که در جهت سرعت برشی مرتعش می‌شوند، طراحی ابزار بیشتر در حالتی است که ارتعاش در جهت سرعت برشی ایجاد شود. به‌علت استفاده از مود طولی ارتعاشی در این گونه ابزارها، معمولاً به قید و بند مخصوصی نیاز است که فضای کاری مفید ماشین‌های تراش را محدود می‌کند [19]. لذا استفاده از مود خمشی برای ابزار ارتعاشی یک‌بعدی و تلفیق مود خمشی و طولی برای ابزار ارتعاشی دوبعدی برای بهبود عملکرد و قابل استفاده شدن صنعتی این گونه ابزارها در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است. طول این ابزار ارتعاشی در مقایسه با ابزارهای ارتعاشی قبلی کوتاه‌تر است، بنابراین میزان دمپینگ موجود در ابزار کاهش می‌یابد و امواج با راندمان بیشتری به نوک ابزار منتقل می‌شوند. در ابزار ارتعاشی با مود خمشی مانند مبدل التراسونیک ساندویچی لانگوین (Langewin) پیزوالکتریک‌ها تحت پیش‌تنش اولیه می‌باشند، لذا می‌توان آن‌را برای توان‌های بالا طراحی کرد. در این ابزار جنس پشت‌بند، نگهدارندهٔ ابزار برشی، مهره و پیچ از جنس فولاد (St 304)، مواد پیزوالکتریک استفاده شده از نوع PZT-4 و ابزار برشی ابزار از جنس تنگستن کاربایدمی‌باشند که مشخصات مواد استفاده شده برای ساخت این ابزار در جدول (۱) آورده شده است.

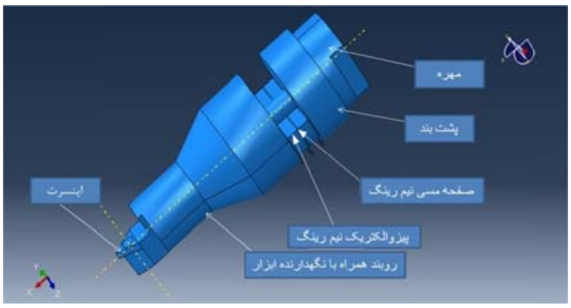
برای ایجاد مدل مبدل التراسونیک در نرم‌افزار اباکوس ابتدا یک مدل دوبعدی از مقطع هر قطعه ایجاد می‌شود و سپس حول محور Z دوران داده می‌شود تا قطعات مدل شوند. در این ابزار به‌منظور تحریک مود خمشی از

پیزوالکتریک‌های نیم‌رینگ PZT- 4 استفاده شده است که به‌صورت متقارن نیم‌رینگ بالا و نیم‌رینگ پایین در بین پشت‌بند و نگهدارندهٔ ابزار برشی می‌باشند که توسط پیچ مرکزی مطابق مبدل التراسونیک ساندویچی لانگوین تحت پیش تنش قرار می‌گیرند. چیدمان پیزوالکتریک‌های مبدل التراسونیک در شکل (۱) نشان داده شده است.

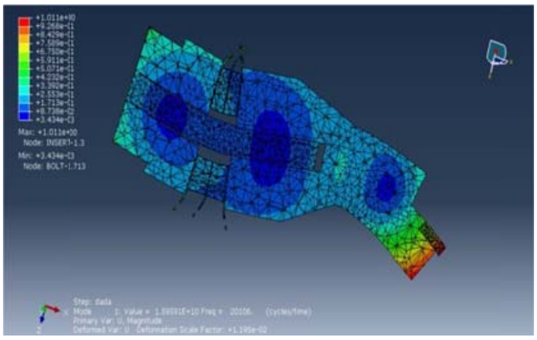
در چیدمان پیزوالکتریک‌ها باید دقت کرد که سطوح مثبت پیزوالکتریک‌ها با یکدیگر و صفحات منفی پیزوالکتریک‌ها با بدنهٔ ابزار در تماس باشند زیرا در این صورت قطب منفی جریان الکتریکی به بدنه ابزار وصل می‌شود. در بین سطوح تماس به‌منظور انتقال جریان الکتریکی به پیزوالکتریک‌ها، صفحات مسی نیم‌رینگ قرار گرفته است. صفحات مسی نیمهٔ بالایی مطابق پیزوسرامیک‌ها از نیمهٔ پایینی جدا می‌باشند و به‌منظور جلوگیری از اتصال صفحات مسی بالایی و پایینی به یکدیگر صفحه‌ای عایق از جنس تفلون (PTFE) به ضخامت 1 mm در بین آن‌ها قرار گرفته است. هم‌چنین به‌منظور جلوگیری از اتصال صفحات مسی به پیچ مرکزی ابزار، یک بوش تفلونی (PTFE) در بین پیچ و پیزوالکتریک‌ها قرار می‌گیرد. جهت پولاریزاسیون پیزوالکتریک‌ها در راستای محور Z می‌باشد و جریان الکتریکی واردشده به نیم‌رینگ‌های پیزوالکتریکی بالا و نیم‌رینگ‌های پیزوالکتریکی پایین دارای ۱۸۰ درجه اختلاف فاز می‌باشد. در این حالت زمانی که پیزوالکتریک‌های بالا در حالت انبساط باشند، پیزوالکتریک‌های پایین در حالت انقباض هستند و برعکس. از آن‌جا که فرکانس این انبساط و انقباض با فرکانس طبیعی مود ارتعاشی خمشی مورد نظر برابر است، مود ارتعاشی خمشی به حالت تشدید می‌رسد. شکل (۲) شکل ارتعاش ابزار را تحت مود خمشی نشان می‌دهد.

جدول ۱ مشخصات مواد ابزار ارتعاشی با مود خمشی [20]

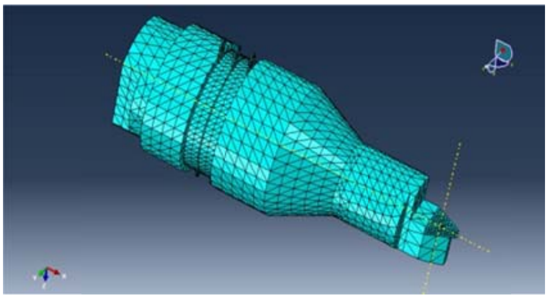
نام قطعه	جنس	چگالی (kg/m^3)	ضریب پواسان	مدول الاستیسیته (Pa)
پشت‌بند(برای ابزار ارتعاشی یک‌بعدی)	SS304	7868	0.292	207e9
پشت‌بند، روبند و قطعه میانی(برای ابزار ارتعاشی دوبعدی)	AL7075T6	2823	0.33	77e9
پیچ مبدل التراسونیک	St304	7868	0.292	207e9
صفحات مسی	Copper	8910	0.3	120e9
روبند	St304	7868	0.292	207e9
صفحات پیزوسرامیکی	PZT4	7517	0.3	67.4e9
ابزار برشی	WC	15800	0.24	550e9
پیچ ابزار برشی	St304	7868	0.292	207e9



شکل ۱ نمایی از چیدمان پیزوالکتریک‌ها در ابزار ارتعاشی با مود خمشی



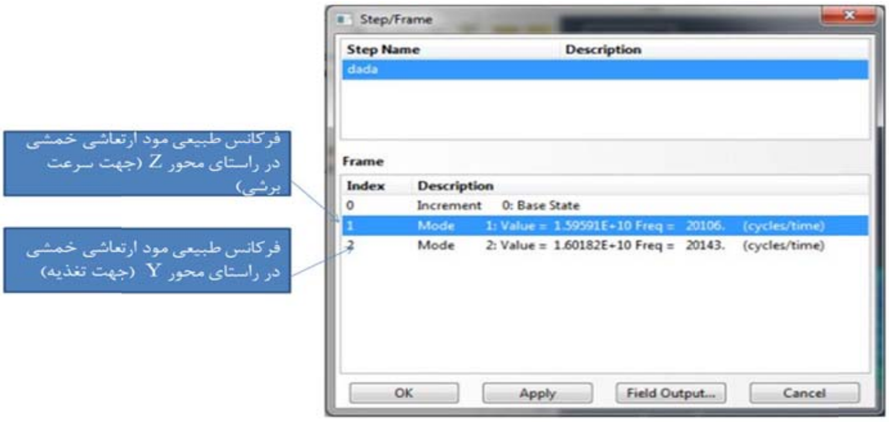
شکل ۲ مود ارتعاش خمشی در ابزار



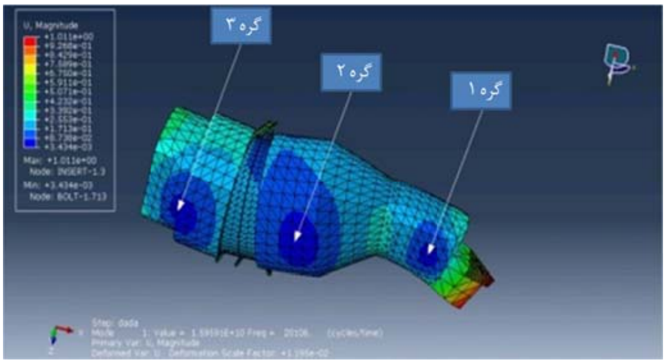
شکل ۳ مدل‌سازی ابزار در نرم‌افزار آباکوس

فرکانس‌های مورد نظر برای مودها در محدودهٔ ۱٦KHz تا ۲۵ KHz تنظیم شد و به‌منظور شبکه‌بندی ابزار برای انجام تحلیل اجزای محدود نوع مش TETRA و المان‌ها از نوع 3D stress انتخاب گردید. در شکل (۳) ابزار مش‌بندی شده در نرم‌افزار آباکوس نشان داده شده است.

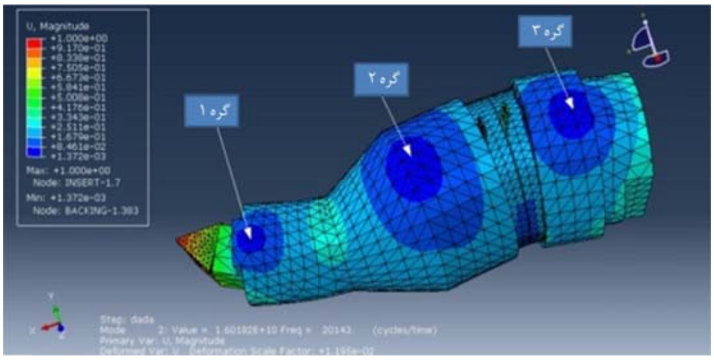
پس از مدل‌سازی ابزار، تحلیل مودال انجام شد که در اولین مرحله فرکانس مود خمشی مورد نظر ۱٦KHz به‌دست آمد که پس از ۳۰۰ مرحله تکرار تحلیل، بهترین شرایط برای ابزار ارتعاشی با مود خمشی به‌گونه‌ای حاصل شد که فرکانس مودهای ارتعاشی موجود در این محدوده مطابق شکل (٤) به‌دست آمد و گره‌های ارتعاشی در مکان‌هایی قرار گرفت که به‌راحتی می‌توان از آن‌ها به‌منظور بستن ابزار بر روی دستگاه تراش استفاده کرد. مود اول از نوع خمشی با حداکثر دامنه در جهت محور Z است. فرکانس تشدید این مود ارتعاشی ۲۰۱۰٦Hz می‌باشد که در شکل (۵) نشان داده شده است. اگر این ابزار به‌صورت افقی بر روی دستگاه تراش نصب شود ارتعاش ابزار که از مود ارتعاشی اول ناشی می‌شود، در راستای سرعت برشی است، بنابراین مود ارتعاشی اول را بایستی تحریک کرد. مود دوم از نوع خمشی با حداکثر دامنه در جهت محور Y است. فرکانس تشدید این مود ارتعاشی ، ۲۰۱٤۳Hz می‌باشد که در شکل (٦) نشان داده شده است. اگر این ابزار به‌صورت افقی بر روی دستگاه تراش نصب شود، ارتعاش ابزار که از مود ارتعاشی دوم ناشی شود در راستای تغذیه خواهد بود. بنابراین مود ارتعاشی دوم برای ابزار مورد نظر مناسب نیست.



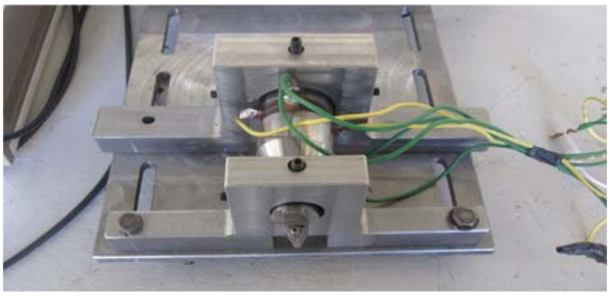
شکل ٤ فرکانس مودهای ارتعاشی حاصل از تحلیل اجزای محدود ابزار



شکل ۵ شکل مود ارتعاشی اول از نوع خمشی در راستای Z



شکل ٦ شکل مود ارتعاشی دوم از نوع خمشی در راستای Z

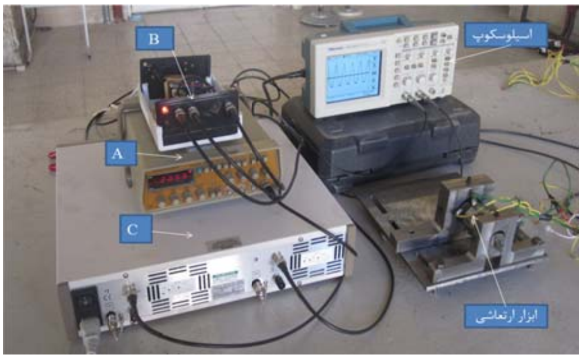


شکل ۷ ابزار ارتعاشی با مود خمشی

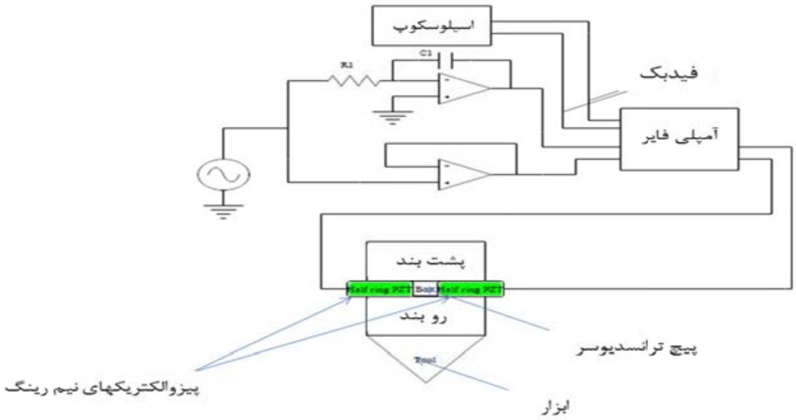
ساخت ابزار ارتعاشی یک‌بعدی با مود خمشی و راه‌اندازی آن. براساس ابعاد به‌دست آمده از تحلیل المان محدود، ابزار ارتعاشی همراه با پیزوالکتریک‌های نیم‌رینگ ساخته شد. شکل (۷) ابزار ارتعاشی یک‌بعدی با مود خمشی ساخته شده را نشان می‌دهد.

برای راه اندازی ابزار ارتعاشی از دستگاه پیزودرایو مدل PZD700 شرکت Treck و فانکشن ژنراتور مدل VG-4429 شرکت Hitachi استفاده گردید. شکل (۸) کنترل ابزار ارتعاشی را نشان می‌دهد.

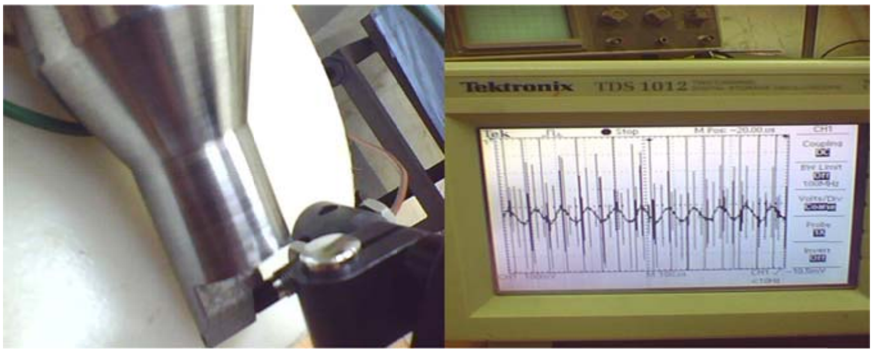
مطابق شکل (۸) تولید کننده موج (Function generator) A وظیفهٔ ایجاد یک جریان سینوسی با فرکانس و دامنهٔ مشخص را به عهده دارد و دستگاه B این جریان سینوسی خروجی از تولید کننده موج را به دو خروجی با ۱۸۰ درجه اختلاف فاز برای دو ورودی پیزو درایور C تبدیل می‌کند. پیزودرایور C این دو جریان ورودی را به دو جریان DC متناوب با اختلاف ۱۸۰ درجه برای تحریک پیزوالکتریک‌های نیم‌رینگ بالا و پایین تبدیل می‌کنند. در شکل (۹) نمای شماتیکی از مدار کنترل ابزار ارتعاشی با مود خمشی نشان داده شده است.



شکل ۸ کنترل و راه‌اندازی ابزار ارتعاشی



شکل ۹ شماتیکی از مدار کنترل ابزار ارتعاشی با مود خمشی



شکل ۱۰ اندازه‌گیری دامنهٔ ارتعاش ابزار ارتعاشی با مود خمشی

برای اندازه‌گیری دامنهٔ ارتعاش و فرکانس از حسگر اندازه‌گیری دامنه و فرکانس ارتعاش (Eddy Current Gap sensor) مدل AEC-5509 ساخت شرکت Applied Electronics استفاده گردید. شکل (۱۰) نحوهٔ اندازه‌گیری و مقدار آن را بر روی دستگاه اسیلوسکوپ نشان می‌دهد.

مطابق شکل (۱۰) دامنهٔ ارتعاش اندازه‌گیری شده از ابزار µm ۳۲ (به‌صورت پیک تا پیک) و فرکانس آن KHz ۲۰/۲ می‌باشد.

طراحی ابزار ارتعاشی دوجهته با مود بیضوی و ساخت آن

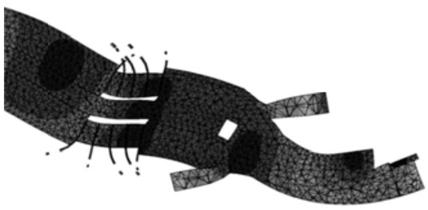
این ابزار دارای ارتعاش در دو جهت طولی و خمشی می‌باشد بنابراین برای مبدل التراسونیک این ابزار به دو مود نیاز است که به اندازهٔ کافی به یکدیگر نزدیک باشند و هم‌چنین برای تحریک این مبدل التراسونیک به دو سری پیزوسرامیک نیاز است. سری اول که در انتهای مبدل التراسونیک قرار دارد، برای تحریک مود طولی استفاده می‌شود. بنابراین در این قسمت از مبدل التراسونیک، رینگ کامل پیزوسرامیکی استفاده شده است. سری دوم پیزوسرامیک‌ها برای تحریک مود خمشی استفاده می‌شوند. در این قسمت از نیم‌رینگ‌های پیزوسرامیکی استفاده شده است.

برای طراحی این مبدل التراسونیک ابتدا یک طرح کلی از مبدل التراسونیک با مود بیضوی در نرم‌افزار آباکوس ایجاد شده است و پس از گرفتن اولین آنالیز و تغییر هندسه به‌منظور نزدیک کردن فرکانس‌های مود طولی و خمشی، پس از حدود ۱۰۰۰ مرحله تحلیل، شرایط خوبی حاصل شد. پس از مدل کردن ابزار، خواص مواد مورد استفاده در قطعات ابزار برای تحلیل مودال وارد می‌شود که پارامترهای مواد مورد نیاز برای تحلیل مودال، چگالی، مدول الاستیسیته و ضریب پواسان می‌باشد. این پارامترها مطابق جدول (۱) می‌باشند. شکل (۱۱) ابزار ارتعاشی بهبودیافته را نشان می‌دهد.

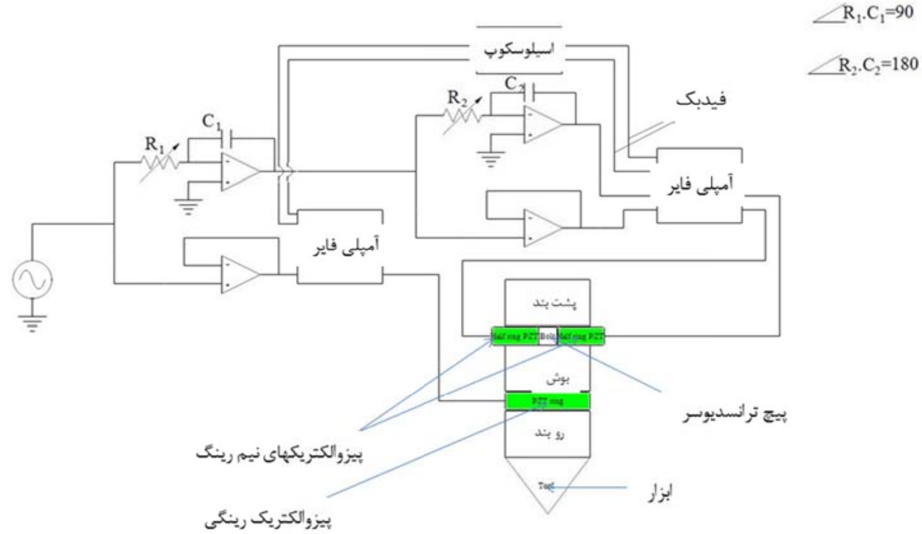


شکل ۱۱ ابزار ارتعاشی با مود بیضوی

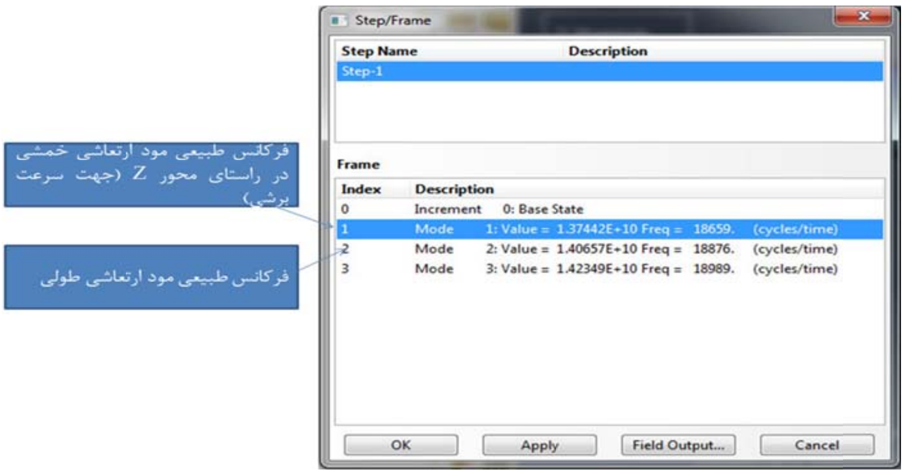
پیزوالکتریک‌های نیم‌رینگ از جنس PZT4 هستند. نیم‌رینگ در نیمهٔ بالایی و نیم‌رینگ دیگر در نیمهٔ پایینی ابزار نصب شده است. در چیدمان پیزوالکتریک‌ها باید دقت کرد که سطوح مثبت پیزوالکتریک‌ها با یکدیگر و صفحات منفی پیزوالکتریک‌های کناری با بدنهٔ ابزار در تماس باشند زیرا در این صورت قطب منفی جریان الکتریکی به بدنهٔ ابزار وصل می‌شود. در بین سطوح تماس به‌منظور انتقال جریان الکتریکی به پیزوالکتریک‌ها، از صفحات مسی نیم‌رینگ استفاده شده است که مانند چیدمان پیزوالکتریک‌های نیم‌رینگ می‌باشند. صفحات مسی نیمهٔ بالایی مطابق پیزوسرامیک‌ها از نیمهٔ پایینی جدا می‌باشند. به‌منظور جلوگیری از اتصال صفحات مسی بالایی و پایینی به یکدیگر صفحه‌ای عایق از جنس تفلون (PTFE) به ضخامت 1 mm در بین آن‌ها قرار گرفته است. هم‌چنین به‌منظور جلوگیری از اتصال صفحات مسی به پیچ مرکزی ابزار، یک بوش تفلونی (PTFE) در بین پیچ و پیزوالکتریک‌ها قرار می‌گیرد. جهت پولاریزاسیون پیزوالکتریک‌ها در راستای محور Z می‌باشد و جریان الکتریکی سینوسی واردشده به پیزوالکتریک‌های رینگی برای تحریک مود طولی و نیم‌رینگ‌های پیزوالکتریکی برای تحریک مود خمشی دارای $\pi/2$ اختلاف فاز می‌باشد. هم‌چنین جریان الکتریکی سینوسی واردشده به نیم‌رینگ‌های پیزوالکتریکی بالا و نیم‌رینگ‌های پیزوالکتریکی پایین دارای اختلاف فاز π نسبت به هم می‌باشد، زیرا در این حالت زمانی که پیزوالکتریک‌های بالا در حالت انبساط باشند، پیزوالکتریک‌های پایین در حالت انقباض هستند و بالعکس. فرکانس این انبساط و انقباض با فرکانس طبیعی مود ارتعاشی خمشی مورد نظر برابر است. بنابراین، مود ارتعاشی خمشی به حالت تشدید می‌رسد. این عمل در شکل (۱۲) نشان داده شده است. یک نمای شماتیکی از مدار کنترل ابزار ارتعاشی با مود خمشی در شکل (۱۳) نشان داده شده است. مجموع این دو مود یک حرکت بیضوی شکل در نوک ابزار ایجاد می‌کند که دارای حرکت در جهات برش و عمق برش فرآیند تراش‌کاری می‌باشد.



شکل ۱۲ عمل انبساط و انقباض در پیزوالکتریک‌های بالا و پایین



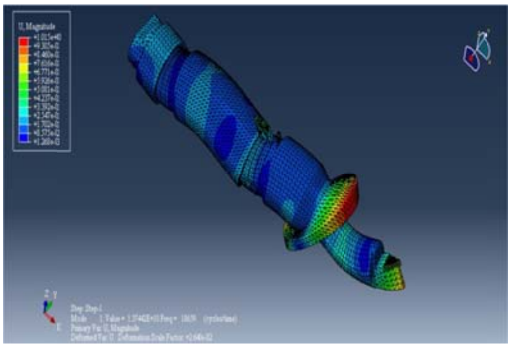
شکل ۱۳ شماتیکی از مدار کنترل پیزوالکتریک‌های تحریک‌کنندهٔ ابزار ارتعاشی با مود بیضوی



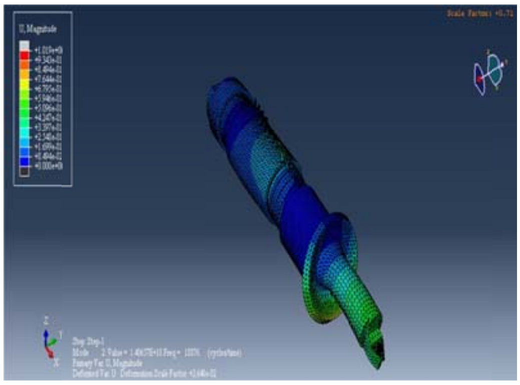
شکل ۱٤ نتایج تحلیل مودال

پس از مش‌بندی تحلیل انجام شد که ابزار در محدودهٔ ۱۵ KHz تا ۲۵ KHz دارای سه مود ارتعاشی است که در شکل (۱٤) آورده شده است. از این سه مود ارتعاشی به‌دست آمده دو مود اول برای کاربرد مورد نظر مناسب هستند که به‌صورت زیر می‌باشد:

مود یک، یک مود خمشی در جهت مورد نظر (Z) است و فرکانس تشدید آن ۱۸٦٥۹ Hz می‌باشد. مود دو از نوع طولی است و فرکانس تشدید آن ۱۸۸۷٦ Hz است. شکل‌های (۱٦ و ۱۵)، شکل مود و دامنهٔ ارتعاش را برای دو مود نشان می‌دهند. مطابق شکل‌های (۱٦ و ۱۵)، ملاحظه می‌شود که در این آنالیز هیچ مود ارتعاشی بین مود طولی و خمشی وجود ندارد و فاصلهٔ بین دو مود به کمترین مقدار خود (۲۱۷Hz) رسیده است. بنابراین، طراحی این ابزار برای ماشین‌کاری ارتعاشی مناسب است.



شکل ۱۵ شکل مود و توزیع دامنهٔ مود یک

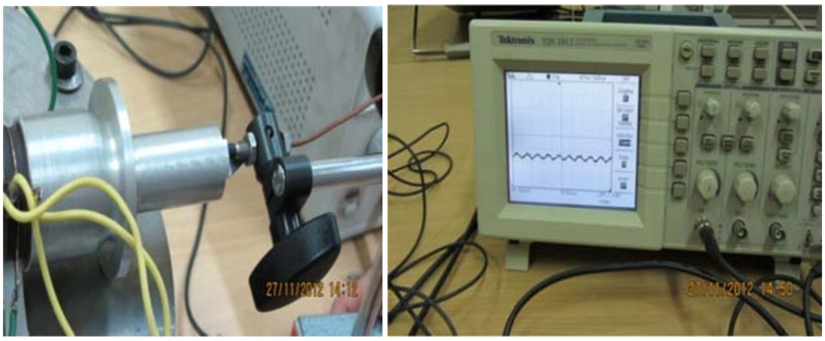


شکل ١٦ شکل مود و توزیع دامنهٔ مود دو

ساخت ابزارهای ارتعاشی دوبعدی و راه‌اندازی آن. پس از مونتاژ این قطعات، و ساخت ابزار ارتعاشی با مود بیضوی، تحریک مود طولی و مود خمشی دارای $\pi/2$ اختلاف فاز نسبت به هم می‌باشد که در نتیجهٔ این عمل یک ارتعاش بیضوی شکل در نوک ابزار ارتعاشی با مود بیضوی ایجاد می‌شود. برای این منظور از یک پیزودرایور (Piezo Driver)دو کاناله استفاده شد که یک کانال آن به پیزوسرامیک‌های انتهایی برای تحریک مود طولی و کانال دیگر به پیزوسرامیک‌های جلویی برای تحریک مود خمشی وصل می‌شود. در ورودی این پیزودرایور یک مدار به‌گونه‌ای طراحی شده‌است که بین دو کانال پیزودرایور $\pi/2$ اختلاف فاز ایجاد کند. تجهیزات کنترلی این ابزار ارتعاشی تراش‌کاری با مود بیضوی در شکل (۱۷) آورده شده است که تولید کننده موج یک جریان سینوسی برای مدار طراحی شده تولید می‌کند و سپس مدار طراحی شده این جریان را به دو کانال برای پیزودرایور تبدیل می‌کند و سپس خروجی پیزودرایور به مبدل التراسونیک متصل شده‌است. برای نشان دادن این که ابزار در حالت تشدید است از یک اسیلوسکوپ استفاده می‌شود. توسط حسگر اندازه‌گیری دامنهٔ ارتعاش ادی کارنت، دامنهٔ ارتعاش ابزار در دو جهت ۱۵ µm اندازه‌گیری شد (شکل ۱۸).



شکل ۱۷ تجهیزات کنترلی ابزار ارتعاشی تراش‌کاری با مود بیضوی



شکل ۱۸ اندازه‌گیری دامنهٔ ارتعاش ابزار ارتعاشی دوبعدی

جدول ۲ مشخصات تجهیزات مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها

	مدل و سازنده	مشخصات
دستگاه تراش	TN50 ماشین‌سازی تبریز	توان ۵/۵ کیلو وات
دینامومتر	9257B کیستلر	اندازه گیری نیرو تا ۱۰ کیلو نیوتن و حداقل میزان اندازه گیری۰.۰۵ نیوتن
زبری سنج	PS1 ماهر	با میزان اندازه گیری ۰.۰۱ میکرون
تولید کننده موج	VG-4429 هیتاچی	با فرکانس صفر تا ۵ مگا هرتز
دستگاه VMM	ایسون	با میزان اندازه گیری یک میکرون

انجام آزمایش‌ها

به‌منظور تأیید عملکرد ابزار ارتعاشی یک‌بعدی و دوبعدی آزمایش‌های مربوط بر روی دستگاه تراش انجام گردید. در انجام این آزمایش‌ها از تجهیزات زیر استفاده گردید:

- دستگاه تراش با مدل TN50 ساخت ماشین‌سازی تبریز، برای انجام عملیات تراش‌کاری.
- دستگاه دینامومتر با مدل 9257B ساخت شرکت کیستلر، برای اندازه‌گیری نیروی ماشین‌کاری.
- دستگاه زبری‌سنج با مدل PS1 ساخت شرکت ماهر، برای اندازه‌گیری زبری سطح قطعه‌کار.
- پیزودرایو مدل PZD700 ساخت شرکت Trek، جهت تحریک پیزوالکتریک ها.
- تولید کننده موج مدل VG-4429 ساخت شرکت هیتاچی، برای ارسال پالس با فرکانس مورد نظر.
- دستگاه اندازه‌گیری نوری VMM، برای مشاهدهٔ سطح قطعه‌کار.

در جدول (۳) تجهیزات و مشخصات مربوط برای انجام آزمایش‌ها آورده شده است.

آزمایش ابزار ارتعاشی یک‌بعدی با مود خمشی. شکل (۱۹) آماده‌سازی آزمایش‌ها برای تأیید عملکرد ابزار ارتعاشی را نشان می دهد. همان‌طور که در شکل (۱۹) مشاهده می‌شود ابزار ارتعاشی به‌صورت ابزار سنتی بر روی دستگاه تراش نصب شده است. و دینامومتر نیز در زیر پایهٔ ابزار قرار گرفته است. محل گرفتن ابزار در ابزارگیر، نقاط گره ارتعاشی می‌باشد، زیرا در این نقاط ابزار دارای هیچ گونه ارتعاشی نیست و هم‌چنین ابزارگیر تأثیری بر روی فرکانس طبیعی ابزار ندارد. ماشین‌کاری ارتعاشی بر روی مس انجام شد. شرایط ماشین‌کاری مس در جدول (۳) آورده شده است. حین انجام عملیات ماشین‌کاری ارتعاشی، نیروی ماشین‌کاری در جهت برشی (از آن‌جایی که ارتعاش

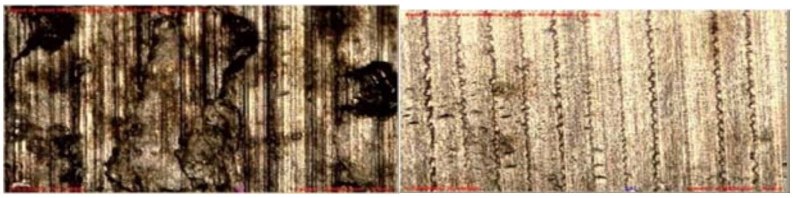
ابزار نیز در همین راستا است) اندازه‌گیری شد. در شکل (۲۰) سطوح ماشین‌کاری شده به‌شیوهٔ معمولی و ارتعاشی یک‌بعدی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۲۰-الف) مشاهده می‌شود چاله‌هایی بر روی سطح ماشین‌کاری شدهٔ مس قرار دارد که اثر تشکیل و جدا شدن لبهٔ انباشته است ولی در تراش‌کاری به‌کمک ارتعاشات التراسونیک یک‌بعدی (شکل ۲۰-ب) به‌دلیل این‌که لبهٔ انباشته تشکیل نمی‌شود، سطح کاملاً صاف می‌باشد و Ra ماشین‌کاری معمولی ۱/۹۵ و ماشین‌کاری ارتعاشی ۱/۵ میکرومتر است. نتایج نیرویی در جدول (۵) آورده شده است. مطابق جدول (۵)، با استفاده از ابزار ارتعاشی در فرآیند تراش‌کاری، علاوه بر بهتر شدن صافی سطح نیروی اصلی ماشین‌کاری (نیروی برشی) نیز به‌صورت قابل‌توجهی کاهش پیدا کرده است که باعث افزایش عمر ابزار برشی می‌شود.



شکل ۱۹ آماده‌سازی آزمایش با ابزار یک‌بعدی

جدول ۳ شرایط ماشین‌کاری ارتعاشی مس

سرعت اسپیندل (rev/min)	۸
سرعت پیشروی (m/rev)	۰/۰۸
ابزار WC	γ0 =0∘, α0 =15∘, κγ =45∘, κ γ =45∘, rε = 1.2mm
فرکانس (kHz)	۲۱/٤۷
جنس قطعه‌کار	مس با قطر ۳۸ میلی متر با قطر ۲۰ میلی متر
a(mm)	۰/٤
دامنه ارتعاشات µm	۳۲



(ب) (الف)

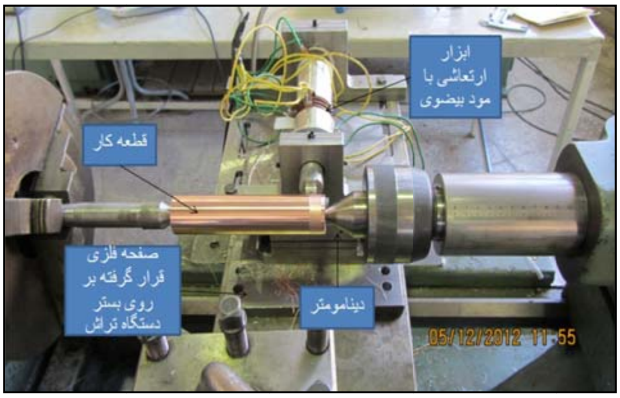
شکل ۲۰ سطوح ماشین‌کاری شدهٔ مس به‌شیوهٔ الف) معمولی ب) ارتعاشی یک‌بعدی

جدول ٤ شرایط ماشین‌کاری ارتعاشی دوبعدی مس

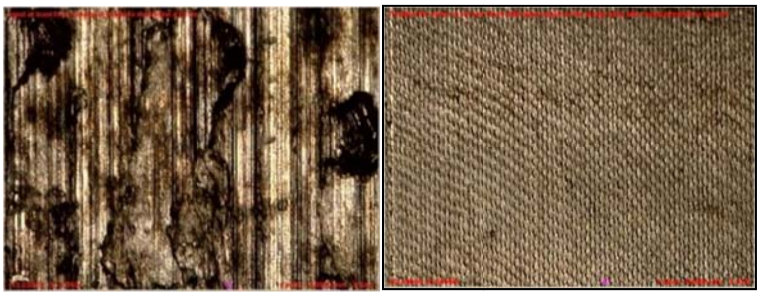
سرعت اسپیندل (rev/min)	۲۰
سرعت پیشروی (_m/rev)	۰/۰۸
ابزار WC	γ0 =0∘, α0 =15∘, κγ =45∘, κ γ =45∘, rε = 1.2mm
فرکانس (kHz)	۱۸/۸
جنس قطعه‌کار	مس
قطر قطعه‌کار (mm)	۳۸
a(mm)	۰/٤
دامنه ارتعاشات µm	۱۵

جدول ۵ نیروهای ماشین‌کاری مس با ابزارهای ارتعاشی یک‌جهته و دوجهته

شرایط تراش‌کاری	نیروی برشی(N)	نیروی پیش‌روی(N)	نیروی شعاعی(N)
تراش‌کاری معمولی	۷۰	٤۲/٦	۱۲/۵
تراش‌کاری با ابزار ارتعاشی یک‌جهته	۵۵	۲٦/٦	۱۱/۷
تراش‌کاری یا ابزار ارتعاشی دوجهته	۱۰/۵	۸	٤/۲



شکل ۲۱ ابزار ارتعاشی دوبعدی نصب شده بر روی دستگاه تراش



(ب)　　　　(الف)

شکل ۲۲ سطوح ماشین‌کاری شدهٔ مس به شیوهٔ الف) ارتعاشی و ب) معمولی

آزمایش ابزار ارتعاشی دوبعدی با مود بیضوی. شکل (۲۱) ابزار ارتعاشی یا مود بیضوی نصب شده بر روی دستگاه تراش را نشان می‌دهد. این ابزار در نقاط گره ارتعاشی ابزار توسط ابزارگیر مهار شده است. ماشین‌کاری بر روی مس انجام شد. شرایط ماشین‌کاری مس در جدول (٤) آورده شده است. در جدول (۵) نیروهای ماشین‌کاری و زبری سطح حاصل از ماشین‌کاری معمولی، ماشین‌کاری ارتعاشی یک‌بعدی و ماشین‌کاری ارتعاشی دوبعدی بر روی مس مقایسه شده است. در شکل (۲۲) سطوح ماشین‌کاری شدهٔ مس به‌شیوهٔ معمولی و ارتعاشی دوبعدی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۲۲–ب) مشاهده می‌شود چاله‌هایی بر روی سطح ماشین‌کاری شدهٔ مس قرار دارد که اثر تشکیل و جدا شدن لبهٔ انباشته است ولی در تراش‌کاری به‌کمک ارتعاشات التراسونیک دوبعدی (شکل۲۲–الف) به‌دلیل این‌که لبهٔ انباشته تشکیل نمی‌شود، سطح کاملاً صاف می‌باشد و Ra ماشین‌کاری معمولی ۱/۹۵ و ماشین‌کاری ارتعاشی ۰/۷۵ میکرومتر است.

نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق طراحی و ساخت ابزار ارتعاشی التراسونیک به‌صورت یک‌بعدی و دوبعدی می‌باشد. پس از ساخت ابزارها، آزمایش‌هایی برای سنجش آن‌ها در فرآیند تراش‌کاری انجام گرفت. بدین منظور ابتدا ابزار ارتعاشی با مود خمشی و سپس ابزار ارتعاشی با مود بیضوی ساخته شد. ابزار ارتعاشی یک‌جهته با مود خمشی که ارتعاش آن در جهت برش است و دارای طراحی جدید و کارآمدی است و قابلیت صنعتی شدن را دارد طراحی و ساخته شد. این نوع ابزار به‌دلیل این‌که همانند مبدل التراسونیک ساندویچی لانگوین پیزوالکتریک‌ها تحت پیش‌تنش اولیه است توان آن قابل افزایش است و هم‌چنین می‌توان تعداد پیزو الکتریک‌ها را افزایش داد و به‌دلیل کوتاه بودن طول ابزار، می‌توان آن را به‌راحتی بر روی دستگاه تراش نصب کرد و به‌دلیل ارتعاش منظم این ابزار، نیروها به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. سپس یک ابزار ارتعاشی تراش‌کاری التراسونیک بیضوی در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس به‌گونه‌ای طراحی شد که مود خمشی و طولی مورد نظر دارای حداقل فاصلهٔ فرکانسی باشند، به‌طوری که در عمل بتوان این دو مود ارتعاشی را در یک فرکانس به‌حالت تشدید رساند. در این ابزار از یک سری پیزوالکتریک رینگی در انتهای ابزار برای تحریک مود طولی و یک سری پیزوالکتریک نیم‌رینگ در جلوی ابزار برای تحریک مود خمشی استفاده شده است. ارتعاش طولی و خمشی دارای اختلاف فاز $\pi/2$ می‌باشند که باعث ایجاد یک ارتعاش بیضوی در نوک ابزار می‌شود. در نهایت از این ابزار برای تراش‌کاری مس استفاده شد که نیروهای ماشین‌کاری را کاهش داد و هم‌چنین کیفیت سطح قطعه نیز بهبود پیدا کرد.

مراجع

1. Xiao, M., Sato, K., Karube, S. and Soutome, T., "The effect of tool nose radius in ultrasonic vibration cutting of hard metal", *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. 43, pp. 1375-1382, (2003).
2. Xiao, M., Wang, Q. M., Sato, K., Karube, S., Soutome, T. and Xu, H., "The effect of tool geometry on regenerative instability in ultrasonic vibration cutting", *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. 46, pp. 492-499, (2006).
3. Moriwaki, T., Shamoto, E. and Inoue, K., "Ultraprecision Ductile Cutting of Glass by Applying Ultrasonic Vibration", *CIRP Annals - Manufacturing Technology,* Vol. 41, pp. 141-144, (1992).
4. Nath, C., Rahman, M. and Neo, K. S., "A study on ultrasonic elliptical vibration cutting of tungsten carbide", *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 209, pp. 4459-4464, (2009).
5. Nath, C., Rahman, M. and Neo, K. S., "Machinability study of tungsten carbide using PCD tools under ultrasonic elliptical vibration cutting", *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. 49, pp. 1089-1095, (2009).
6. Nath, C., Rahman, M. and Neo, K. S., "A study on the effect of tool nose radius in ultrasonic elliptical vibration cutting of tungsten carbide", *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 209, pp. 5830-5836, (2009).
7. Song, Y., Nezu, K., Park, C.-H. and Moriwaki, T., "Tool wear control in single-crystal diamond cutting of steel by using the ultra-intermittent cutting method", *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. 49, pp. 339-343, (2009).
8. Zhou, Z., Zhang, Y., Li, X. and Sun, B., "Application of gas-fluid atomization technology in

ultrosonic vibration cutting titanium alloy workpiece", *Acoustical Physics,* Vol. 55, pp. 925-928, (2009).

9. Ostasevicius, V., Gaidys, R., Rimkeviciene, J. and Dauksevicius, R., "An approach based on tool mode control for surface roughness reduction in high-frequency vibration cutting", *Journal of Sound and Vibration,* Vol. 329, pp. 4866-4879, (2010).
10. Shamoto, E. and Moriwaki, T., "Study on Elliptical Vibration Cutting", CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 43, pp. 35-38, (1994).
11. Shamoto, E. and Moriwaki, T., "Ultaprecision Diamond Cutting of Hardened Steel by Applying Elliptical Vibration Cutting", CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 48, pp. 441-444, (1999).
12. Shamoto E, Moriwaki, T., "Ultra-precision Ductile Cutting of Glass by Applying Ultra-sonic Elliptical Vibration Cutting", Proceedings of 1st International Conference and General Meeting of EUSPEN, pp. 408-411,5 sep., (1999).
13. Suzuki, N., Haritani, M., Yang, J., Hino, R. and Shamoto, E., "Elliptical Vibration Cutting of Tungsten Alloy Molds for Optical Glass Parts", CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 56, pp. 127-130, (2007).
14. Gläbe, R., Brinksmeier, E., "Elliptical Vibration Cutting of Steel with Diamond Tools", LFM Laboratory for Precision Machining, University of Bremen, Bremen.
15. Moriwaki, T., Ma, C., Shamoto, E. and Wang, L., "Study of machining accuracy in ultrasonic elliptical vibration cutting", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, pp. 1305-1310, (2004).
16. Cerniway, M. A., "Elliptical Diamond Milling: Kinematics, Forces and Tool Wear", Department of Mechanical and Aerospace Engineering, North Carolina State University, (2001).
17. Suzuki, N., Shamoto, E. and Hino, R., "Analysis of 3D elliptical vibration cutting with thin shear plane model", CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 57, pp. 57-60, (2008).
18. Amini, S., Soleimanimehr, H., Nategh, M.J., Abudollah, A. and Sadeghi, M.H., "FEM analysis of ultrasonic-vibration-assisted turning and the vibratory tool", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 20, pp. 43-47, (2007).
19. Amini, S., Soleimanimehr, H. and Nategh, M.J., "Application of DOE for modeling surface roughness in ultrasonic vibration turning", *Journal of Mechanics*, (2009).
20. http://www. matweb .com, (2014).